

А. В. ЕФИМОВ, д-р техн. наук,

Т. В. ПОТАНИНА, аспирантка НТУ «ХПИ»

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК МЕЖДУ ЭНЕРГОБЛОКАМИ АЭС С ВВЭР-1000

В статті запропоновано методику застосування теорії динамічного програмування для розв'язання задачі оптимального розподілу електричних навантажень між енергоблоками АЕС. Методика заснована на можливості застосовувати даний метод оптимізації для будь-якого виду експлуатаційних характеристик енергоблоків і враховувати будь-які обмеження, що накладаються на параметри.

В статье предлагается методика применения теории динамического программирования для решения задачи оптимального распределения электрических нагрузок между энергоблоками АЭС. Методика основана на возможности применять данный метод оптимизации для любого вида эксплуатационных характеристик энергоблоков и учитывать любые ограничения, налагаемые на параметры.

The technique of dynamic programming theory application for the optimal distribution of electric loadings between power units of the NPP problem decision is developed. This technique based on an opportunity to apply the given optimization method for any power units operational characteristics and to take into account any restrictions imposed on optimized parameters.

Введение. Одним из направлений решения проблемы надежной и безопасной эксплуатации действующих энергоблоков ТЭС и АЭС является автоматизация задач технологического управления процессами и объектами – создание АСУ ТП на уровне энергоблоков, электростанций и энергосистем. В то же время, несмотря на имеющуюся текущую информацию в АСУ ТП энергоблоками, ее использование для решения таких важных задач, как оперативный анализ технико-экономических показателей, определение энергетических характеристик оборудования, интеллектуальной поддержки оператора, экологического мониторинга и других задач, не является достаточно эффективным [1]. Из-за недостаточной надежности средств управления, неподготовленности технологического оборудования и отсутствия необходимого алгоритмического обеспечения в эксплуатирующихся АСУ ТП используются практически только информационно-вычислительные системы. Поэтому возникает необходимость интеграции в рамках АСУ ТЭС и АЭС задач технологического и экономического управления, которое реализуется с помощью алгоритмов оптимального управления, математических программ и, помимо задач поддержания заранее заданных величин регулируемых

параметров, решает задачу определения оптимальных стратегий при любом изменении внешних условий.

Постановка задачи. Настоящая статья посвящена разработке методики применения теории динамического программирования для решения с помощью автоматизированного комплекса программ [2] задачи оптимального распределения нагрузок на основании эксплуатационных характеристик энергоблоков с целью автоматизации процессов управления энергоблоками АЭС с ВВЭР-1000.

Решение задачи. Параметры и характеристики основного и вспомогательного оборудования энергоблоков АЭС, элементов их тепловых схем изменяются в процессе эксплуатации в результате действия различных факторов. Факторы, оказывающие влияние на электрическую мощность и тепловую экономичность энергоблока, можно разбить на следующие группы: 1) энергосистемные условия, определяющие график электрической нагрузки во времени; 2) условия отпуска теплоты, определяющие график теплофикационной нагрузки, количество и качество пара, отпускаемого потребителям; 3) условия циркуляционного водоснабжения, определяющие давление в конденсаторах (температура и качество охлаждающей воды, периодичность чистки трубных пучков конденсаторов и т.д.); 4) эксплуатационные ухудшения экономических характеристик проточной части турбины, теплообменного оборудования, насосов и т.п. в результате изменения их состояния в межремонтный период; 5) показатели надежности основного и вспомогательного оборудования, которые определяют необходимость плановых и аварийных отключений этого оборудования. Оценить результат воздействия перечисленных факторов на основные показатели выработки электрической и тепловой энергии позволяют эксплуатационные характеристики энергоблоков. Они являются исходной информацией при решении задач поиска оптимальных режимов управления работой энергетического оборудования, в том числе и задач оптимального распределения нагрузок между энергоблоками АЭС.

В работе [3] были получены интегральные зависимости влияния отклонений параметров оборудования паротурбинных установок ТЭС и АЭС от расчетных величин на электрическую мощность \bar{N} и тепловую экономичность \bar{q} турбоустановок на частичных режимах в диапазоне нагрузок $0,4 \div 1,0 \bar{D}$ ($\bar{D} = D/D_0$, D – расход свежего пара на исследуемом режиме, D_0 – расход свежего пара на номинальном режиме):

$$\bar{N} = F(\bar{D}, \Delta X_i), \quad \bar{q} = \Phi(\bar{D}, \Delta X_i), \quad i = \overline{1, p}, \quad (1)$$

где ΔX_i – отклонения основных и гидравлических параметров от номинальных значений, p – число параметров, изменение влияния которых учитывается в характеристиках (1).

При эксплуатации энергоблоков расход свежего пара может отклоняться от номинальных значений в силу различных причин. Главное место среди различных факторов, определяющих падение выработки электроэнергии и на зарубежных, и на отечественных АЭС, занимают повреждения парогенераторов. Поэтому математическая модель эксплуатационных характеристик энергоблоков АЭС должна быть построена с учетом изменяющихся во время эксплуатации параметров этих агрегатов. Из ряда эксплуатационных характеристик парогенераторов ПГВ-1000 определение и исследование зависимостей паропроизводительности (расхода пара) этих агрегатов от изменения в процессе эксплуатации тепловых и гидравлических параметров теплоносителя и рабочего вещества представляют наибольший интерес, так как оказывают основное влияние на эффективность работы энергоблоков [4].

На основании результатов серии численных экспериментов, проведенных на разработанном автоматизированном комплексе программ, имитирующем функциональное состояние энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 [2], и их обработке с помощью методов регрессионного и дисперсионного анализа, были получены функциональные зависимости абсолютного значения электрической мощности N энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 при изменении параметров его основного и вспомогательного оборудования:

$$\begin{aligned}
 N = N_0 - [N_0 - f_1(\overline{\Delta X}, \overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4})] \times \\
 \psi(\overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4}) - \\
 - f_2(\overline{\Delta X}_K, \overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4}) \times \\
 \psi(\overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4}) - \\
 - [N_0 - \psi^T(\overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4}) \times \\
 f_3(\overline{\Delta X}_T, \overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4})],
 \end{aligned} \tag{2}$$

где N_0 – электрическая мощность, вырабатываемая турбоустановкой при $1,0 \bar{D}$; $\overline{\Delta X} = (\Delta X_1, \dots, \Delta X_p)$ – вектор отклонений основных и гидравлических параметров от номинальных значений; $\overline{\Delta X}_K$ – вектор отклонений параметров конденсатора от номинальных значений; $\overline{\Delta X}_T$ – вектор отклонений параметров теплофикационной установки; $\overline{\Delta X}_{PGl} = (\Delta t_1^l, \Delta t_{PV}^l, \Delta p_2^l, \Delta p_1^l)$ – вектор отклонений параметров l -го парогенератора ($l = 1, \dots, 4$); функция

$f_1(\overline{\Delta X}, \overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4})$ определяет зависимость влияния на мощность отклонений гидравлических и тепловых параметров подогревателей систем регенерации высокого и низкого давлений, сепаратора-пароперегревателя, КПД отсеков проточной части турбины, параметров теплоносителя и рабочего вещества каждого парогенератора; функция $f_2(\overline{\Delta X}_K, \overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4})$ определяет зависимость отклонения мощности в зависимости от условий работы конденсационной установки с учетом изменяющихся параметров парогенераторов; функция $f_3(\overline{\Delta X}_T, \overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4})$ учитывает влияния на мощность отклонений параметров теплофикационной установки на различных режимах, при условии что последние определяются отклонением параметров парогенераторов; $\psi(\overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4})$ – мощность на номинальном или частичном режиме, определяемая только отклонением параметров парогенераторов; $\psi^T(\overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4})$ – то же при подключенной теплофикации.

В обобщенной форме (2) можно представить в виде функциональной зависимости следующего вида:

$$N = N_0 - \Delta N(\overline{\Delta X}, \overline{\Delta X}_K, \overline{\Delta X}_T, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4}). \quad (3)$$

Тепловая экономичность q при изменении параметров основного и вспомогательного оборудования энергоблока АЭС представляет собой следующее функциональное соотношение:

$$\begin{aligned} q = q_0 - [q_0 - \varphi_1(\overline{\Delta X}, \overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4}) \times \\ \nu(\overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4})] - \\ - \varphi_2(\overline{\Delta X}_K, \overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4}) \times \\ \nu(\overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4}) - \\ - [q_0 - \nu^T(\overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4}) \times \\ \varphi_3(\overline{\Delta X}_T, \overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4})], \end{aligned} \quad (4)$$

где функция q_0 – удельный расход теплоты при $1,0 \bar{D}$; $\varphi_1(\overline{\Delta X}, \overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4})$ определяет зависимость влияния на удельный расход теплоты отклонений гидравлических и тепловых параметров подогревателей систем регенерации высокого и низкого давлений, сепаратора-пароперегревателя, КПД отсеков проточной части турбины, параметров теплоносителя и рабочего вещества каждого

парогенератора; функция $\varphi_2(\overline{\Delta X}_K, \overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4})$ определяет зависимость отклонения удельного расхода теплоты в зависимости от условий работы конденсационной установки с учетом изменяющихся параметров парогенераторов; $\varphi_3(\overline{\Delta X}_T, \overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4})$ учитывает влияния на q отклонений параметров теплофикационной установки на различных режимах, при условии что последние определяются отклонением параметров парогенераторов; $\psi(\overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4})$ – удельный расход теплоты на номинальном или частичном режиме, определяемый только отклонением параметров парогенераторов; $\psi^T(\overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4})$ – то же при подключенной теплофикации.

В обобщенной форме (4) можно представить в виде функциональной зависимости следующего вида:

$$q = q_0 - \Delta q(\overline{\Delta X}, \overline{\Delta X}_K, \overline{\Delta X}_T, \overline{\Delta X}_{PG1}, \overline{\Delta X}_{PG2}, \overline{\Delta X}_{PG3}, \overline{\Delta X}_{PG4}) . \quad (5)$$

Полученные зависимости (2)-(5) позволяют оценивать влияния различных факторов: изменений теплогидравлических параметров теплоносителей и рабочих веществ основного и вспомогательного оборудования, энергосистемных параметров на работу энергоблока АЭС с ВВЭР-1000, климатических условий (температуры охлаждающей воды, температуры окружающего воздуха), оптимизировать режимы работы энергоблока, использовать полученные функциональные соотношения для решения задачи оптимального распределения нагрузок между энергоблоками электростанций.

Задача оптимального распределения электрических нагрузок между параллельно работающими энергоблоками АЭС представляет собой достаточно сложную задачу управления, обусловленную неопределенностью исходной информации, многовариантностью, сложностью учета фактического состояния оборудования энергоблоков и других факторов, и в общем виде может быть сформулирована следующим образом:

$$Q_{CT} = \sum_{j=1}^n Q_j(N_j) \xrightarrow{u} Q_{CT}^{\min} , \quad (6)$$

где Q_{CT} – суммарный расход теплоты по станции, $Q_j(N_j)$ – расход теплоты j -го энергоблока ($j = 1, \dots, n$), Q_{CT}^{\min} – минимум общего расхода теплоты, $u = \{u_j\} \in U$ – множество допустимых управляющих воздействий в виде задания по электрической мощности отдельным энергоблокам.

Эксплуатационные характеристики энергоблока АЭС (2)–(5) позволяют представить расход теплоты Q_j по отдельному энергоблоку в виде функции отклонений параметров энергетического и тепломеханического оборудования от номинальных значений и аппроксимировать ее квадратичным полиномом:

$$Q_j(N_j) = \alpha_j + \beta_j N_j + \gamma_j N_j^2, \quad (7)$$

где $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ – постоянные коэффициенты, определяемые для каждого режима работы j - го энергоблока методом наименьших квадратов, N_j – электрическая нагрузка j - го энергоблока.

Задача оптимального распределения заданной суммарной электрической нагрузки между n энергоблоками формулируется следующим образом:

функция цели

$$Q_{CT}(N_{CT}) = \sum_{j=1}^n Q_j(N_j) \rightarrow \min, \quad (8)$$

где $Q_{CT}(N_{CT})$ – общий расход теплоты станции, зависящий от суммарной нагрузки N_{CT} , $Q_j(N_j)$ – расход теплоты j - го энергоблока, зависящий от нагрузки N_j этого энергоблока;

ограничения по допустимым электрическим нагрузкам энергоблоков и суммарной нагрузке станции:

$$\left. \begin{aligned} N_j^{\min} &\leq N_j \leq N_j^{\max} \\ N_{CT} &= \sum_{j=1}^n N_j \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Задача (8)–(9) является задачей оптимального управления, в которой под оптимальным процессом управления будем понимать распределение нагрузок (то есть получение набора N_1^*, \dots, N_n^*), обеспечивающее заданную величину суммарной нагрузки N_{CT} и минимальный общий расход теплоты Q_{CT} . Значения N_1^*, \dots, N_n^* выбираются среди всевозможных комбинаций N_j , для которых выполняется (9).

Достаточно эффективным алгоритмом решения задачи (8)–(9) является алгоритм поиска оптимального решения с использованием метода динамического программирования [5]. Особенностью данной задачи является тот факт, что расход теплоты любого энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 зависит только от мощности рассматриваемого блока и не зависит от мощностей других энергоблоков, вследствие отсутствия поперечных связей между

моноэнергоблоками электростанции. То есть критерий оптимальности задачи (8) является сепарабельной функцией. Этот факт обеспечивает выполнение принципа оптимальности Беллмана: отрезок оптимального процесса от любой его точки до конца процесса сам является оптимальным процессом с началом в данной точке, и применение метода динамического программирования возможно [5].

Используем дискретную форму записи уравнений принципа динамического программирования.

На первом этапе метода динамического программирования решения задачи (8)–(9) для любого фиксированного $j \in [1; n]$ строится функция Беллмана $Bel^j(Z^j)$ и определяются ее решения $N_j^{opt}(Z^j)$, где Z^j – возможная суммарная электрическая мощность станции с j работающими энергоблоками; верхние индексы указывают на количество совместно работающих энергоблоков, а нижние – на порядковый номер рассматриваемого энергоблока. Величина функции Беллмана для некоторого значения Z^j равна минимальному значению расхода теплоты при j эксплуатируемых энергоблоках при условии, что суммарная нагрузка Z^j распределяется между этими энергоблоками оптимально.

При $j = 1$ имеем:

$$Bel^1(Z^1) = Q_1(Z^1); \quad (10)$$

$$N_1^{opt}(Z^1) = Z^1, \quad (11)$$

где Z^1 изменяется с некоторым выбранным шагом в интервале

$$Z^1 \in [N_1^{\min}, \min(N_1^{\max}, N_{CT})]. \quad (12)$$

При любом фиксированном $j > 1$ функция Беллмана принимает вид:

$$Bel^j(Z^j) = \min_{N_j} [Q_j(N_j) + Bel^{j-1}(Z^j - N_j)], \quad (13)$$

где

$$Z^j \in [\min_{1 \leq s \leq j} (N_s^{\min}), N_{CT}]; \quad (14)$$

при фиксированном Z^j :

$$N_j \in [N_j^{\min}, \min(N_j^{\max}, Z^j)]. \quad (15)$$

В (12) и (14) интервалы изменения возможной суммарной нагрузки колеблются от минимальных значений до заданных.

На втором этапе динамического программирования – обратный ход – определяются искомые оптимальные значения электрической мощности каждого энергоблока в обратном порядке:

$$\begin{aligned} N_n^* &= N_n^{opt}(N_{CT}), \\ &\vdots \\ N_1^* &= N_1^{opt}(N_{CT} - \sum_{j=2}^n N_j^*). \end{aligned} \tag{16}$$

Выводы. Разработанная методика применения теории динамического программирования для решения задачи оптимального распределения электрических нагрузок между энергоблоками АЭС основана на возможности применять данный метод оптимизации для любого вида эксплуатационных характеристик энергоблоков и учитывать любые ограничения, налагаемые на оптимизируемые параметры, что позволяет автоматизировать процессы управления энергоблоками атомных электростанций.

Список литературы: 1. Дуэль М.А. Концептуальные основы построения интегрированной АСУ электростанцией // Энергетика і електрифікація. – 2007. – № 8. – С. 16-24. 2. Ефимов А.В., Потанина Т.В. Разработка имитационной модели энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 для решения задач анализа, управления и диагностики // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2006. – № 2. – С. 84-91. 3. Палагин А.А., Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д. Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок. – К.: Наук. думка, 1991. – 201 с. 4. Потанина Т.В., Ефимов А.В. Разработка модели влияния изменения параметров теплоносителя и рабочего вещества на паропроизводительность парогенераторов ПГВ-1000 энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – № 9. – С. 60–65. 5. Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 400 с.

Поступила в редколлегию 13.11.07